

А.Е.Меркулов

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ И РЕЖИМОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СОДЕРЖАНИИ В ШИХТЕ СЫРОГО ИЗВЕСТНЯКА

Для условий ДП-5 ОАО «Северсталь» и ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» выполнено аналитическое исследование показателей и процессов плавки при изменении содержания сырого известняка в шихте с варьированием распределения материалов по радиусу печи. Внутренние связи процессов в объеме доменной печи, влияющие на характер режимов плавки и конечные результаты, выявлены с помощью разработанной в Институте многозонной математической модели доменной плавки.

доменная плавка, известняк, распределение температур

Цель и постановка задачи. Задачей настоящей работы является оценка с позиций системного подхода влияния на показатели плавки содержания сырого известняка в шихте разной степени офлюсования (работа выполнена под руководством д.т.н., проф. И. Г. Товаровского). Известные оценки на основе эмпирических данных и балансовых расчетов [1, 2] дают, главным образом, связи исходных параметров и конечных результатов (расход кокса, производительность) с использованием лишь отдельных промежуточных параметров без раскрытия всей полноты внутренних связей, влияющих на характер режимов плавки и конечные результаты.

Для системной оценки влияния содержания сырого известняка в шихте на показатели плавки в настоящей работе используется разработанная в ИЧМ НАН Украины математическая модель [3], отличающаяся тем, что на основе структурной увязки многозонных по высоте и радиусу доменной печи и общих балансов масс и теплоты увеличены прогнозные возможности модели, в том числе по установлению новых количественных связей процессов и выявлению влияния неравномерности распределения материалов по радиусу печи на показатели плавки.

Особенности модели и методики исследования. Протекание процессов теплопередачи и восстановления железа в кольцевых зонах по высоте столба шихты описывается в модели дискретно системой материально-тепловых балансов в 12 зонах по вертикали с интервалами температур шихты от начальной до 400⁰С и далее через каждые 100⁰С вплоть до температуры продуктов плавки. Каждая из вертикальных зон характерна своей спецификой протекания процессов тепло- и массопередачи, а также перехода материалов от твердой фазы к жидкой через тестообразное состояние. В периферийной кольцевой зоне по всей высоте столба шихты учитывается потеря теплоты через стенки печи.

Равновеликим по горизонтальной площади колошника кольцевым зонам соответствуют 10 угловых положений лотка бесконусного загрузочного устройства. Загрузка этих зон отличается друг от друга соотношением компонентов шихты (в первую очередь кокса и железорудной части), задаваемым программой загрузки и вычисляемым в модели загрузки, где предусматривается задание распределения на колошнике каждого отдельного компонента железорудных материалов и кокса. Это обуславливает разный состав шихты и соответственно разный состав формируемых шлаков в разных радиальных кольцевых зонах (РКЗ). В соответствии с этим, температурные границы начала размягчения, плавления и полного ожигения определяются для каждой РКЗ. Зависимость температур начала размягчения, плавления и полного ожигения от химического состава шихты определяли для каждой РКЗ и рассчитывали по разработанной в ИЧМ обобщенной модели, являющейся одним из модулей общей многозонной модели доменной плавки, основанной на прогнозировании этих температур при помощи интегральных критериев «свертки» химического состава с учетом межатомного взаимодействия компонентов шлаковой связки с последующей корректировкой указанных температур по степени восстановления материалов и количеству вносимых и циркулирующих в печи щелочных оксидов (K_2O+Na_2O). Таким образом, весь объем столба шихты разбит на $10 \times 12 = 120$ условных ячеек, для каждой из которых выполняется расчет зонального материально-теплогового баланса, увязанного с общим материально-тепловым балансом печи.

Новый подход открыл дополнительные возможности анализа процессов и формирования мер по повышению эффективности плавки, включающие: выявление лимитирующей зоны по высоте и поперечному сечению печи; количественный учет повышенной тепловой нагрузки на газовый поток в периферийной зоне (за счет теплопотерь); учет перетоков газа на разных горизонтах из одних РКЗ в другие; оценку развития восстановительного процесса, в частности степени прямого восстановления, в кольцевых сечениях по радиусу печи; установление влияния распределения материалов по радиусу печи на теплопотери, а также влияния всех технологических факторов на расход кокса с учетом изменения теплопотерь; оценку роли зоны размягчения и плавления (с учетом влияния степени восстановления железа и прихода щелочных оксидов) в формировании режимов плавки и соответствующих температурно-концентрационных полей печи.

Для оценки влияния содержания железа в шихте на показатели процессов доменной плавки использовали данные о работе доменных печей №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» полезным объемом 5000 м^3 и №5 ОАО «Северсталь» полезным объемом 5500 м^3 в характерные периоды их работы, принятые в качестве базовых. Невязки баланса газифицированных элементов в базовых периодах минимизировали путем корректировки состава колошникового газа на ДП-9 и содержания кислорода в дутье на

ДП-5 – параметров, наиболее вероятно вносящих по результатам анализа, наибольшие погрешности. Далее, задавая различные содержания сырого известняка в шихте (с соответствующей корректировкой остальных компонентов), выполнили расчетные прогнозы показателей процессов плавки для двух вариантов распределения относительных рудных нагрузок на ковшнике (рис. 1).

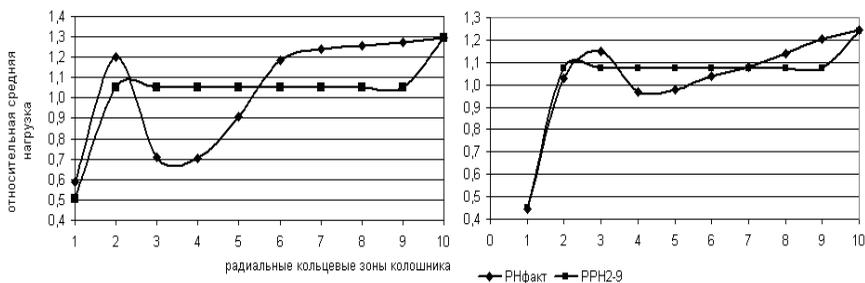


Рис.1. Распределение относительных рудных нагрузок по РКЗ ковшника ДП-9 (слева) и ДП-5 (справа) при фактических условиях (РНфакт) и при переходе к равномерному распределению в РКЗ 2–9 (РРН_{2.9})

Анализ результатов. Используемая методика расчетов предусматривает пересчет состава одного из агломератов по условиям получения заданного расхода известняка. С этой целью после определения расхода известняка при заданных расходах кокса и дутьевых добавок, определяют его отклонение от заданного ($\Delta И$), после этого новый состав агломерата считают как средневзвешенный для суммы расхода агломерата и $\Delta И$.

В табл.1 и 2 приводятся результаты расчетов показателей плавки по модели для ДП-5 ОАО «Северсталь» и ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» соответственно. По этим данным определено, что при выводе из шихты каждых 10 кг/т чугуна сырого известняка за счет увеличения степени офлюсования агломератов и окатышей экономия кокса и прирост производительности составляют 0,5 – 0,6%. При колебаниях температуры ковшникового газа $\pm 1 \div 2^\circ\text{C}$ и степени прямого восстановления $\pm 0,1 \div 0,2\%$ их влияние на расход кокса незначительно, так что эффект определяется сокращением затрат теплоты на разложение карбонатов и взаимодействие выделенного диоксида углерода с твердым углеродом кокса (степень взаимодействия принята 50%).

На рис.2–7 приводятся результаты расчетов параметров процессов плавки для двух рассматриваемых печей при наличии в составе шихт сырого известняка: 0, 100 и 200 кг/т чугуна. Изменение температурного поля при увеличении содержания сырого известняка в шихте происходит на обеих печах в направлении снижения температур в шахте и уменьшения разности температур между газом и шихтой (рис.2, 4, 5, 7).

Анализ численных значений показал, что на ДП-9 ОАО «Арселор-Миттал Кривой Рог» средняя для 10 РКЗ величина разности температур между газом и шихтой уменьшилась при увеличении расхода сырого известняка от 0 до 200 кг/т в ВТЗ 1-6 со 120 до 70 градусов, а в ВТЗ 7-9 – с 477 до 450 градусов. Соответствующие величины на ДП-5 ОАО «Северсталь» составили 95–61 градус и 370–360 градусов. На этой печи в большинстве РКЗ в области 700–900⁰С наблюдается уменьшение разности температур газа и шихты до близких к нулю значений.

Вариант равномерного распределения рудных нагрузок (РРН2–9) приводит на обеих печах к лучшему использованию теплоты газового потока, следствием которого является снижение температуры колошникового газа (табл. 1, 2), а также к увеличению равномерности распределения температур в поперечном сечении доменной печи, следствием которого является увеличение количества РКЗ в области 700–900⁰С с разностью температур между шихтой и газом близкой нулю (рис.4, 7).

Зона размягчения и плавления (ЗРП) при фактическом распределении рудной нагрузки (РНфакт) в условиях ДП-5 ОАО «Северсталь» при увеличении расхода известняка до 100 кг/т (рис. 3) изменилась незначительно, а при увеличении расхода известняка до 200 кг/т – существенно: толщина на периферии увеличилась в 2 раза до 3,6 м, температуры начала размягчения и плавления уменьшились по сравнению с базовым вариантом на 25–40⁰С. На ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с увеличением расхода известняка произошло смещение ЗРП в область распара на периферии и небольшое смещение вниз в оси (рис.6). При этом толщина ЗРП увеличилась на 0,4–1,2 м, а температуры начала размягчения и плавления уменьшилась на 15–25⁰С. Переход к равномерному распределению материалов на колошнике (РРН2–9) с увеличением расхода известняка в шихте на обеих печах приводит к дополнительному смещению вниз и выравниванию ЗРП в РКЗ-2-9, что способствует увеличению твердофазной области и экономии топлива.

Заключение. Расчетно-аналитическое исследование процессов доменной плавки при разном количестве сырого известняка в шихте с помощью математической модели позволило, наряду с количественным уточнением связей исходных параметров и конечных результатов (расход кокса, производительность), раскрыть внутренние связи процессов в объеме печи, влияющие на характер режимов плавки и конечные результаты.

Установлено, что с увеличением количества сырого известняка в шихте происходит уменьшение разности температур газа и шихты, особенно в области температур шихты 700–900⁰С, а также смещение изотерм в низ печи. Зона размягчения и плавления также смещается в низ печи с увеличением толщины отдельных её элементов.

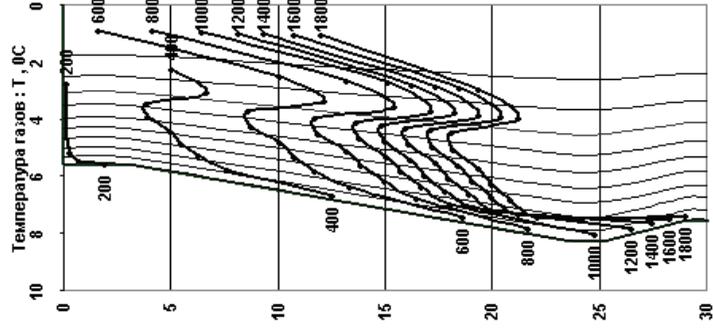
Таблица 1. Показатели доменной плавки для условий ДП-5 при изменении содержания известняка в шихте и при переходе к равномерному распределению РН_{отн} по РКЗ

Показатели	РНфакт			РН2-9		
	0	100	200	0	100	200
<i>Расход известняка, кг/т</i>	0	100	200	0	100	200
Удельн. произ-сть, т/м ³ сут	1,756	1,647	1,573	1,839	1,723	1,610
Расход тверд. топлива, кг/т	422	451	471	406	433	461
Дутье: расход, м ³ /мин.	7848	7795	7763	7854	7791	7756
температура, °С	1184	1184	1184	1184	1184	1184
кислород, %	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3
Расход тех. кислорода, м ³ /т	57,53	60,90	63,50	54,98	58,19	62,01
расход природного газа, м ³ /т	106	106	106	106	106	106
то же в % к дутью	9,06	8,56	8,21	9,48	8,95	8,4
Температура кол. газа, °С	260	265	251	198	207	222
содержание, % СО	21,31	22,48	22,97	20,80	21,87	22,66
СО ₂	19,70	19,45	19,67	20,33	20,16	20,05
Н ₂	6,91	6,75	6,53	6,98	6,81	6,57
Всего А+О+Р	1587	1530	1473	1587	1530	1473
Железо в шихте, %	59,64	59,57	59,51	59,68	59,61	59,53
Железо в А+О+Р, %	59,75	61,9	64,15	59,75	61,9	64,15
Рудная нагрузка, т/т	3,77	3,63	3,57	3,91	3,78	3,64
Вынос пыли общий, кг/т	24,35	25,37	26,20	24,01	24,99	25,99
Количество шлака, кг/т	270	272	272	269	271	272
Теоретич. тем-ра горения, °С	2001	2027	2045	1980	2006	2035
Кол-во фурменного газа, м ³ /т	1695	1782	1849	1629	1712	1810
Кол-во сух. колошн. газа, м ³ /т	1706	1832	1929	1637	1757	1888
Прямое восстанов-е оксида Fe, %	26,20	25,96	24,18	26,27	25,59	23,97
Степень использ. газов, % СО:	48,03	46,38	46,13	49,43	47,97	46,94
Н ₂	48,04	45,68	44,81	49,44	47,27	45,62
общая	48,03	46,22	45,84	49,43	47,80	46,65
Расход углерода, кг/т: общ.	363,4	387,8	404,9	349,6	372,2	396,4
Сжигаемый у фурм из кокса	253,4	271,7	285,8	239,6	257,0	277,7
На прямое восстановление Fe	52,81	52,32	48,70	52,95	51,59	48,27
Общий приход тепла, кДж/кг	4465	4757	4983	4245	4524	4855
в т. ч.: горение кокса	2486	2665	2803	2350	2521	2724
тепло дутья и добавок	1921	2031	2116	1838	1943	2067
Потребность тепла, кДж/кг	3180	3430	3632	3175	3414	3624
в т. ч.: восст-е Fe и л/в элементов	656	672	620	658	662	615
разложение карбонатов	0	208	409	0	204	408
Теплосодержание кол. газа	771	843	844	561	631	731
Остаточное тепло (потери)	514	483	507	509	480	501
Отношение водяных чисел	0,78	0,77	0,77	0,79	0,78	0,77
Теплотв. колошн. газа, кДж/м ³	3443	3574	3613	3387	3504	3577

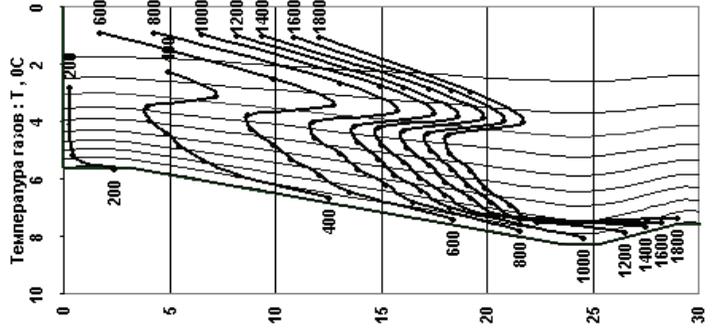
Таблица 2. Показатели доменной плавки для условий ДП-9 при изменении содержания известняка в шихте и при переходе к равномерному распределению РНотн по РКЗ

Показатели	РНфакт			РРН2-9		
	0	100	200	0	100	200
Расход известняка, кг/т	0	100	200	0	100	200
Удельн. произ-сть, т/м ³ сут	1,772	1,686	1,587	1,836	1,760	1,604
Расход тверд. топлива, кг/т	494	517	549	476	496	543
Дутье: расход, м ³ /мин.	6708	6644	6596	6702	6649	6598
температура, °С	1042	1042	1042	1042	1042	1042
кислород, %	29,74	29,74	29,74	29,74	29,74	29,74
Расход тех. кислорода, м ³ /т	141,9	147,8	155,8	136,9	141,7	154,3
расход природного газа, м ³ /т	80,8	80,8	80,8	80,8	80,8	80,8
то же в % к дутью	7,46	7,16	6,8	7,74	7,48	6,86
Температура кол. газа, °С	237	228	222	212	182	212
содержание, % СО	27,72	28,53	29,75	26,80	27,65	29,44
СО ₂	19,91	19,92	19,50	20,79	20,82	19,78
Н ₂	6,16	5,98	5,82	6,17	6,02	5,82
Всего А+О+Р	1653	1597	1542	1653	1598	1542
Железо в шихте, %	55,20	55,12	55,03	55,23	55,15	55,04
Железо в А+О+Р, %	55,22	57,24	59,42	55,22	57,24	59,42
Рудная нагрузка, т/т	3,58	3,50	3,38	3,71	3,65	3,41
Вынос пыли общий, кг/т	62,8	64,6	66,5	62,4	64,1	66,4
Количество шлака, кг/т	409	410	411	409	409	411
Теоретич. тем-ра горения, °С	2222	2237	2256	2208	2221	2253
Кол-во фурменного газа, м ³ /т	1590	1648	1729	1539	1587	1713
Кол-во сух. колошн. газа, м ³ /т	1651	1743	1863	1591	1673	1844
Прямое восстанов-е оксида Fe, %	31,06	30,07	30,38	29,61	28,91	29,71
Степень использ. газов, %СО:	41,80	41,12	39,59	43,68	42,95	40,19
Н ₂	41,80	40,53	38,46	43,70	42,37	39,06
общая	41,80	41,02	39,41	43,69	42,85	40,01
Расход углерода, кг/т: общ.	420,2	439,7	467,2	404,7	422,2	461,9
Сжигаемый у фурм из кокса	306,4	320,8	340,7	293,8	305,7	336,8
На прямое восстановление Fe	59,60	57,82	58,54	56,82	55,58	57,24
Общий приход тепла, кДж/кг	4662	4869	5153	4485	4655	5098
в т. ч.: горение кокса	3006	3147	3342	2882	2998	3304
тепло дутья и добавок	1544	1606	1691	1490	1541	1675
Потребность тепла, кДж/кг	3598	3825	4086	3558	3790	4067
в т.ч.: восст-е Fe и л/в элементов	783	767	781	749	740	765
разложение карбонатов	0	203	410	0	200	408
Теплосодержание кол. газа	691	705	731	598	540	692
Остаточное тепло (потери)	373	339	336	330	325	338
Отношение водяных чисел	0,83	0,83	0,82	0,85	0,85	0,82
Теплотв. колошн. газа, кДж/м ³	4174	4256	4393	4058	4150	4354

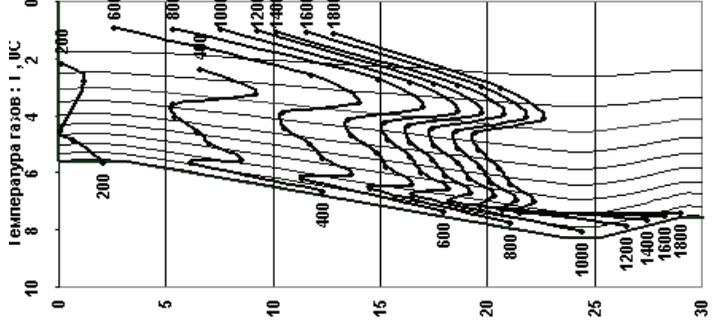
Изв=0 кг/т РНфакт



Изв=100 кг/т РНфакт



Изв=200 кг/т РНфакт



Изв=200 кг/т РРН2-9

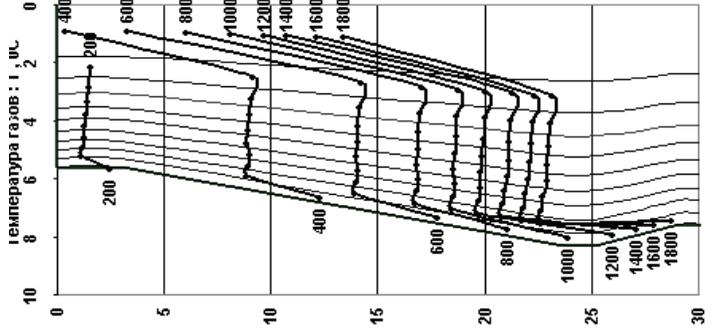


Рис.2. Распределение температур в объеме печи при различном содержании известняка в шихте для условий ДП-5
ОАО «Северсталь»

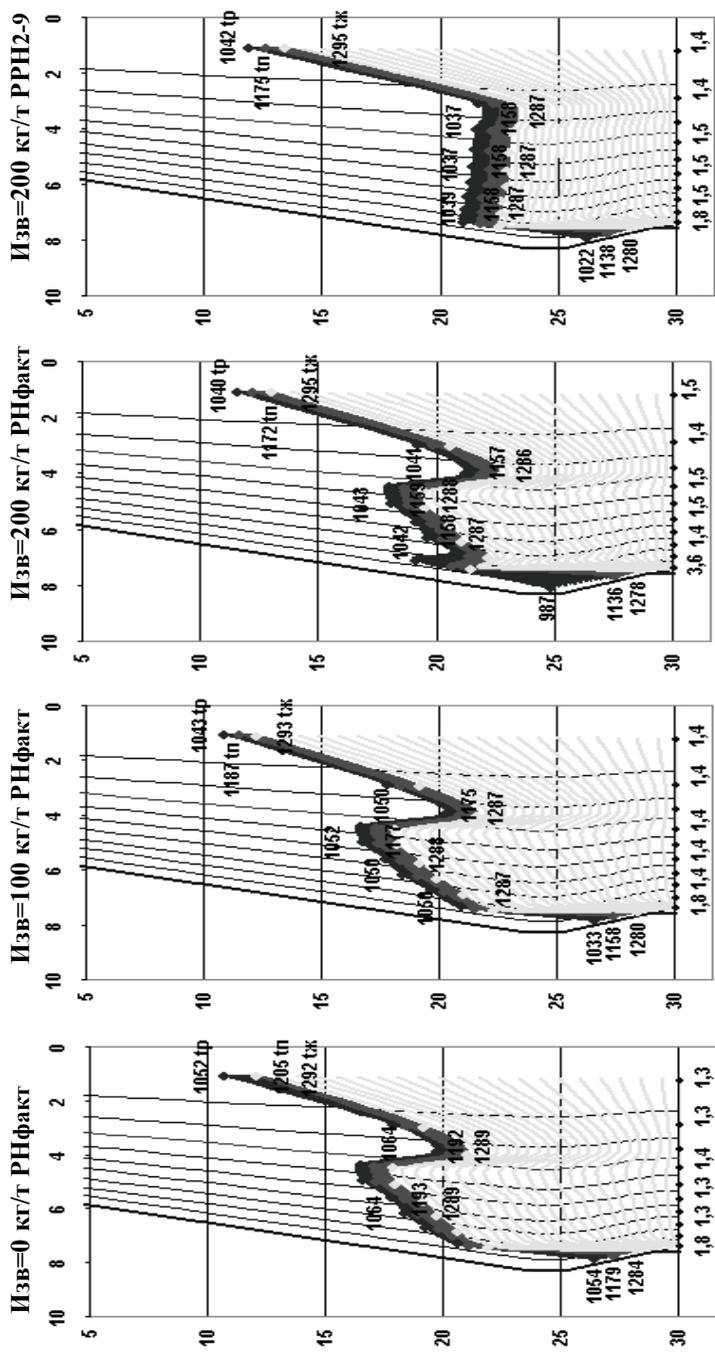
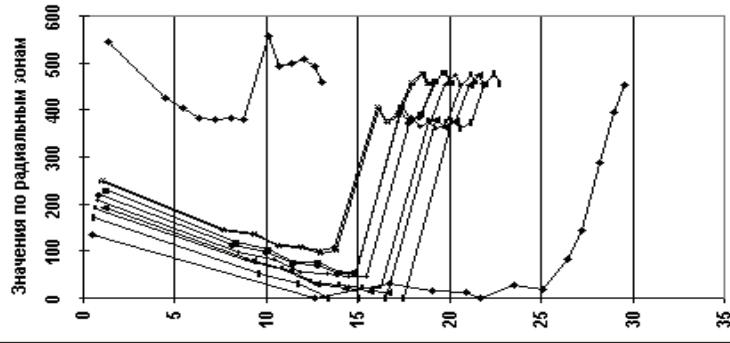


Рис.3. Положение зоны размягчения и плавления материалов в объеме печи при различном содержании известняка в шихте для условий ДП-5 ОАО «Северсталь».

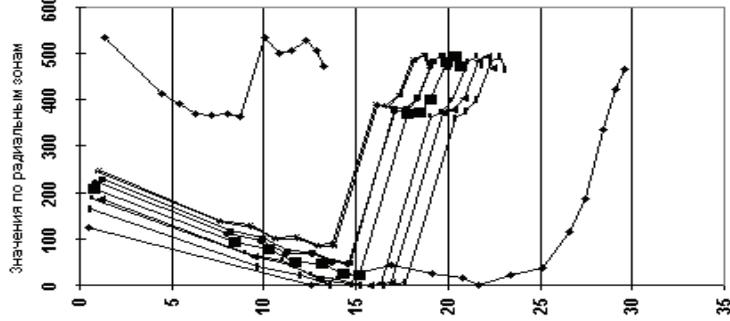
Числа t_p , t_b , t_k – температуры начала размягчения, плавления и ожигания.

По горизонтали – расстояние от оси печи, по вертикали – расстояние от верха печи, м

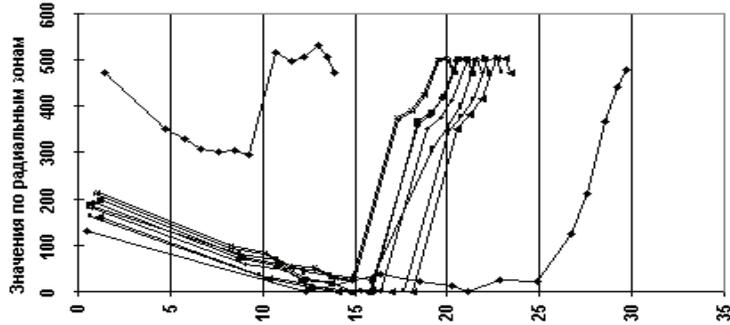
Изв=0 кг/т РНфакт



Изв=100 кг/т РНфакт



Изв=200 кг/т РНфакт



Изв=200 кг/т РРН2-9

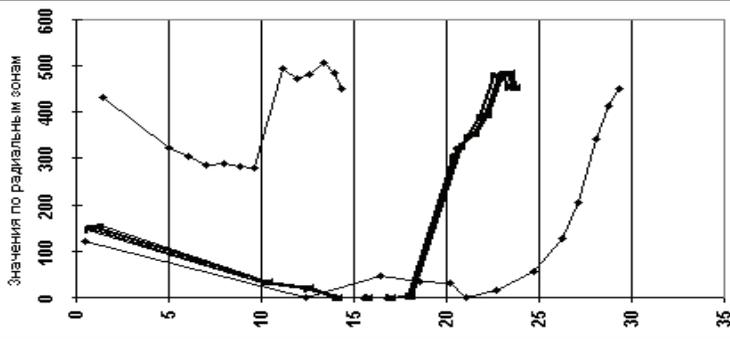
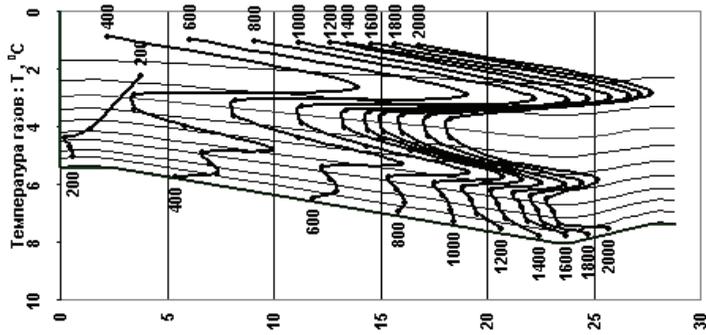
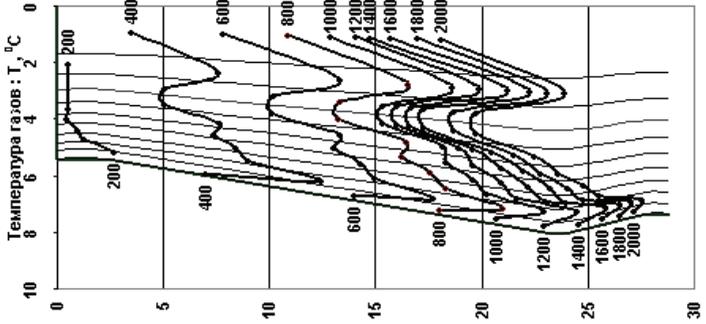


Рис.4. Разность температур газа и шихты (по горизонтали) по высоте ДП-5 ОАО «Северсталь» в РКЗ (r1-r10) при различном содержании известняка в шихте и при разном распределении рудных нагрузок.

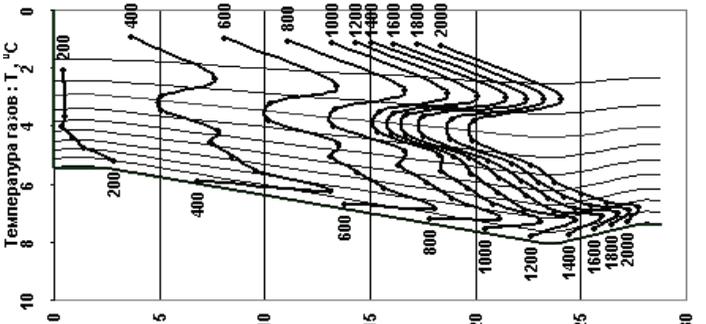
Изв=0 кг/т РНфакт



Изв=100 кг/т РНфакт



Изв=200 кг/т РНфакт



Изв=200 кг/т РРН2-9

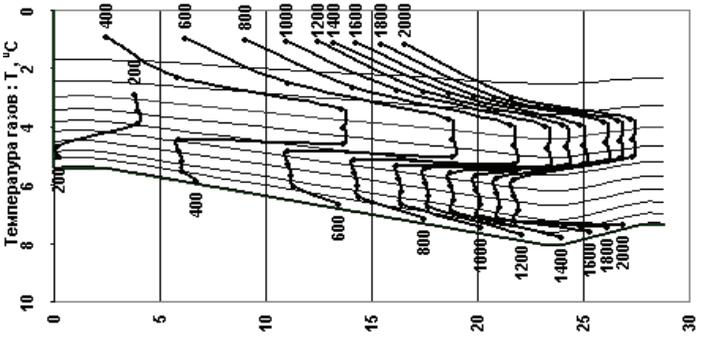


Рис.5. Распределение температур в объеме печи при различном содержании известняка в шихте и распределении материалов на колошнике для условий ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

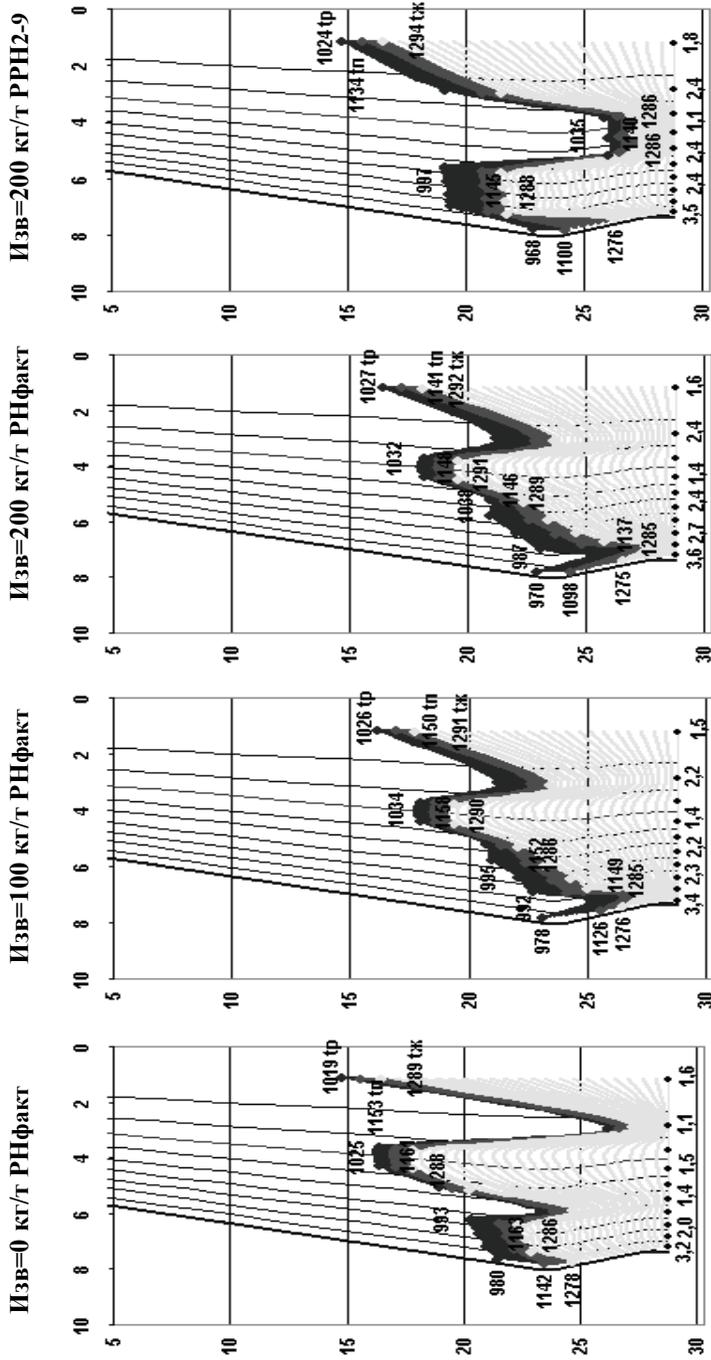


Рис. 6. Положение зоны размягчения и плавления материалов в объеме печи при различном содержании

известняка в шихте для условий ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

Числа t_p , t_m , t_k – температуры начала размягчения, плавления и ожигания.

По горизонтали – расстояние от оси печи, по вертикали – расстояние от верха печи, м

Изв=0 кг/т РНфакт

Изв=100 кг/т РНфакт

Изв=200 кг/т РНфакт

Изв=200 кг/т РРН2-9

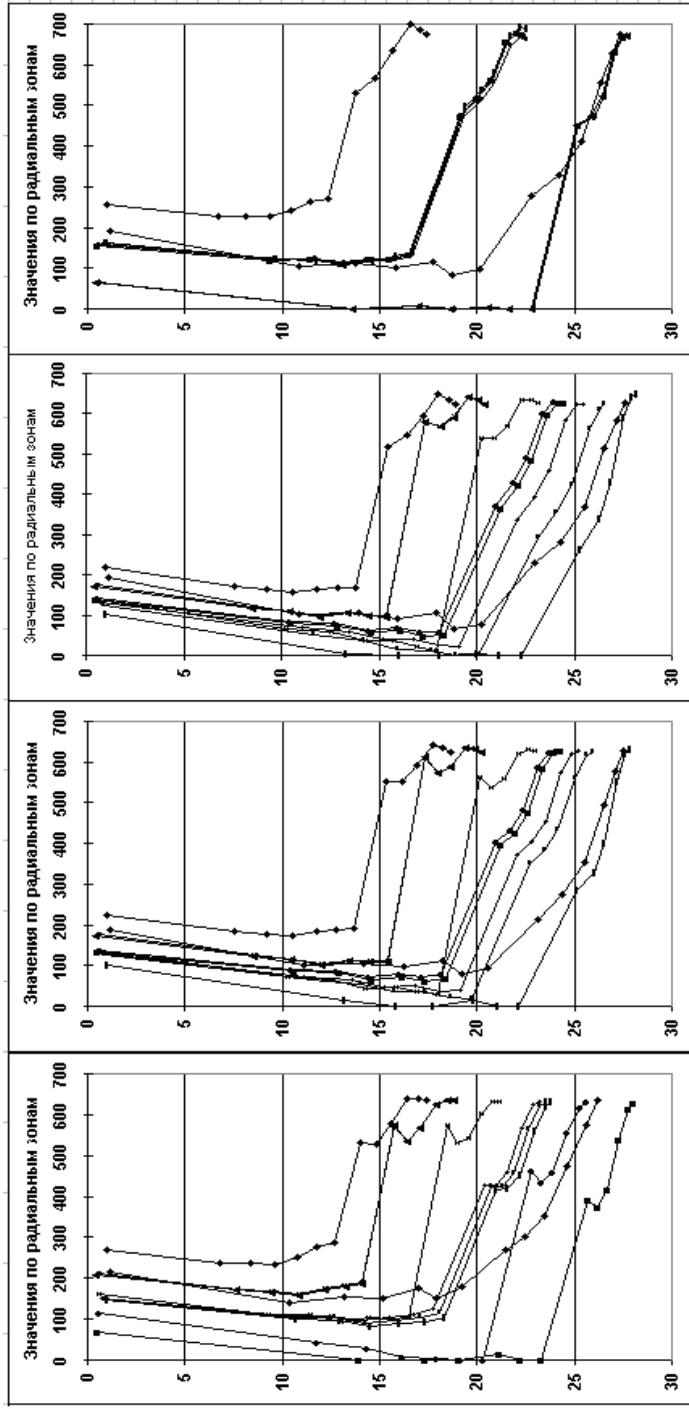


Рис. 7. Разность температур газа и шихты (по горизонтали) по высоте ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в РКЗ (р1-р10) при различном содержании известняка в шихте и при разном распределении рудных нагрузок.

Результирующее влияние указных процессов на конечный расход топлива незначительно, так что экономия от вывода сырого известняка за счет офлюсования агломерата и окатышей определяется, главным образом, основным балансовым фактором – экономией теплоты диссоциации карбонатов Са и Mg и взаимодействия части CO_2 , выделяющейся из CaCO_3 , с углеродом кокса. При выводе из шихты каждые 10 кг/т чугуна сырого известняка экономия кокса составляет $0,5 \div 0,6$ %.

Изложенные закономерности необходимо использовать при системном формировании рациональных режимов плавки.

1. *Рамм А.Н.* Современный доменный процесс.– М.: Metallurgia, 1980.–304 с.
2. *Товаровский И.Г.* Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса. – М.: Metallurgia, 1987. – 192 с.
3. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Монография. 2-е издание. – Днепропетровск: изд. «Пороги», 2009. – 768 с.

*Статья рекомендована к печати
докт.тех.наук И.Г.Муравьевой*

О.Є.Меркулов

Розрахункова оцінка процесів і режимів доменної плавки при різному вмісті у шихті сирого вапняку

Для умов ДП-5 ВАТ «Северсталь» і ДП-9 ВАТ «АрселорМиттал Кривий Ріг» виконано аналітичне дослідження показників і процесів плавки при зміні вмісту сирого вапняку в шихті з варіюванням розподілу матеріалів по радіусу печі. Внутрішні зв'язки процесів в об'ємі доменної печі, плавки, що впливають на характер режимів і кінцеві результати, виявлено за допомогою розробленої в Інституті багатозонної математичної моделі доменної плавки.